

**А.Г. ГУРИН**, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**В.А. КУТОВОЙ**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ННЦ«ХФТИ»;  
**Ю.А. АНТОНЕЦ**, канд. техн. наук, ЗАО «Южкабель», Харьков;  
**В.П. КАРПУШЕНКО**, канд. экон. наук, ЗАО «Южкабель», Харьков  
**Е.С. МОСКВИТИН**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТАЯ ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СУШКИ И ПРОПИТКИ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Разработана вакуумная установка с автоматической системой управления, позволяющая ускорить процесс сушки кабеля в бумажной изоляции, улучшить условия работы обслуживающего персонала, снизить энергопотребление.

Розроблена вакуумна установка з автоматичною системою управління, яка дозволяє прискорити процес сушіння кабелю в паперовій ізоляції, поліпшити умови праці обслуговуючого персоналу, зменшити енергоспоживання.

An automatic control vacuum drier has been developed that provides for acceleration of the process of drying cable, paper-insulated cable, improves working conditions of personnel, decrease energy consumption.

**Постановка проблемы.** Кабельные изделия в бумажной изоляции применяются во многих хозяйствах: энергетике, добывающих и перерабатывающих отраслях промышленности, строительстве, на транспорте, в сельском хозяйстве, быту и других отраслях производства. Производство силовых кабелей развивалось и продолжает развиваться с развитием систем электроснабжения. Поэтому, для увеличения производства силовых кабелей с бумажной изоляцией необходимо учитывать накопленный опыт, сложившуюся структуру производства, качество выпускаемой продукции, энергопотребление, экологию.

Производство кабеля в бумажной изоляции представляет собой сложный производственный процесс, в котором применяются различные материалы и множество технологических операций. Одной из таких технологических операций при производстве кабеля в бумажной изоляции является сушка бумажной изоляции. Этот технологический процесс связан с нагревом кабеля в закрытых вакуумных объемах. Скорость сушки зависит от температуры нагревания, количества влаги в бумажной изоляции, давления в окружающей среде, длительности нагревания электрического кабеля по времени. [1]. Все эти параметры оказывают влияние на скорость сушки кабельных изделий, а также на его эксплуатационные характеристики.

В связи с высокой термочувствительностью электрической изоляции материалов, при разработке технологии сушки изоляции

высоковольтного оборудования возникает вопрос о величине допустимой температуры и допустимой длительности ее воздействия на изоляцию на различных стадиях этого процесса. Эта проблема становится особенно актуальной в последние годы, поскольку основным направлением повышения эффективности и экономичности высоковольтной изоляции является интенсификация процессов тепломассопереноса за счет использования более жестких режимов и изыскания методов, основанных на применении повышенных температур и больших тепловых потоков.

**Анализ последних исследований и публикаций.** По мнению многих авторов [1÷8] оптимальным для процесса сушки является диапазон температур 120÷135°C. При этом нагревостойкость бумажного диэлектрика оценивалась по изменению  $tg\delta$ , электрической прочности и механических свойств (прочности на разрыв и числа двойных перегибов), относительной степени полимеризации кабельной бумаги [8]. В ряде работ отмечается влияние продолжительности термовакуумной обработки на степень старения изоляции, когда при прочих равных условиях ухудшались свойства материалов, уменьшалась относительная степень полимеризации кабельной бумаги. Например, увеличение длительности образцов бумажной изоляции с радиальной толщиной  $h = 10$  мм при  $t = 130^\circ\text{C}$  и  $P = 1 \cdot 10^{-1}$  мм. рт. ст. за время от 9,3 до 17,9 ч приводило к уменьшению степени относительной поляризации от 0,98 до 0,859. Отрицательное действие длительно воздействующего нагрева особенно влияет на разрушение верхних слоев изоляции, где степень относительной поляризации может снижаться до 0,8-0,85. Согласно данным [9], существенного различия по влиянию величины остаточного давления в котле на глубину старения средних и внутренних слоев материала по сравнению с поверхностными слоями замечено не было.

С целью выполнения перечисленных требований к технологическому процессу сушки бумажно-масляной изоляции была проведена модернизация вакуумно-сушильного комплекса на заводе "Южкабель".

**Вакуумная сушильная установка.** Эксплуатация устаревшего оборудования и энергоемкая технология ухудшила техническое состояние участка по производству силовых кабелей с бумажной изоляцией. Это сказывалось при решении вопроса по увеличению мощности производства силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией. Поэтому необходимо было провести техническое перевооружение участка сушки-пропитки на более современное, менее энергоемкое оборудование, позволяющее сократить технологический процесс сушки-пропитки, повысить уровень автоматизации технологического процесса, улучшить качество выпускаемой продукции.

Устаревшая схема вакуумной сушки силовых кабелей с бумажной изоляцией, представлена на рис. 1. Данная схема имеет недостаток,

закрывающийся в том, что нижняя часть вакуумного трубопровода 2 (диаметром 110мм) соединяющего форвакуумный насос 3 с котлом 1 расположена на отметке ниже уровня насоса. При такой схеме расположения трубопровода водяные пары, попадая в трубопровод 2, конденсируются в нем, так как длина вакуумного трубопровода большая, а температура его стенок недостаточная для того, чтобы влага находилась в нем в

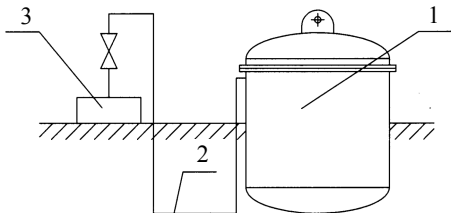


Рис. 1 – Схема вакуумной сушилки силовых кабелей с бумажной изоляцией

газообразном состоянии. Сконденсированная влага скапливается в трубопроводе, тем самым значительно уменьшая его сечение, в связи с чем, понижается скорость удаления влаги из котла. Поэтому необходимо было затратить много энергии и времени, чтобы удалить сконденсированную влагу из вакуумного трубопровода. Для решения этой проблемы необходимо заменить конфигурацию вакуумных трубопроводов, а вакуумную сушилку кабельных изделий производить с помощью специально разработанной вакуумной установки с применением водокольцевых насосов вместо использовавшихся масляных насосов типа АВЗ.

Вновь разработанная схема подключения котла к вакуумному насосу с помощью вакуумных трубопроводов представлена на рис.2. В предлагаемой схеме следует соединять вакуумный насос 4 с котлом 1 в верхней его части и располагать вакуумный трубопровод над последним. [2].

Вакуумный трубопровод состоит из трубопровода 2, который расположен вертикально и трубопровода 3, расположенного с уклоном в сторону вакуумного водокольцевого насоса 4. При данной схеме подключения пары влаги поднимаются по трубопроводу 2 вверх. На первой стадии вакуумной откачки, когда стенки трубопровода 2 имеют комнатную температуру, пары конденсируются в вакуумном трубопроводе 2 и возвращаются обратно в котел 1.

В котле конденсат превращается в пар и устремляется в трубопровод 2. Этот процесс происходит до тех пор, пока трубопровод 2 не нагреется до температуры, при которой пар не конденсируется. Водяной пар, попадая из трубопровода 2 в трубопровод 3, конденсируется, но так как

участок трубопровода имеет наклон в сторону водокольцевого насоса сконденсированная вода уходит в водокольцевой насос. Наклон трубопровода 3 в сторону водокольцевого насоса предусмотрен для того, чтобы устранить возврат сконденсированной влаги обратно в котел, а конденсат не задерживался в трубопроводе 3 и тем самым не уменьшал его пропускную способность. Данная схема соединения вакуумного трубопровода позволяет значительно сократить время сушки, увеличивает эффективность откачки водяного пара из котла, понижает потребление электроэнергии, улучшает экологию окружающей среды. При этом диаметр используемого трубопровода по данной схеме уменьшился со 110 мм до 50мм.

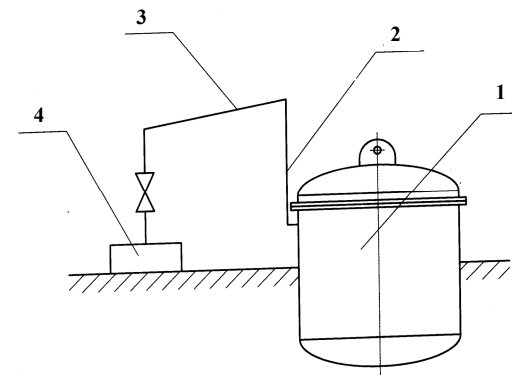


Рис. 2 – Схема подключения котла к вакуумному насосу с использованием вакуумных трубопроводов

При изготовлении электрического кабеля на каждую жилу накладывается изоляция из кабельной бумаги толщиной 120мкм и плотностью 850...1050кг/м<sup>3</sup>. Ленты бумаги накладывают внахлест с положительным перекрытием 8..10мм. [3]. Для устранения обрывности бумажных лент при наложении на жилу кабеля, последние смачивают водой. Равновесная влажность бумаги при нормальных условиях составляет 6...8% по массе. С целью повышения электроизоляционных свойств кабельной продукции необходимо провести сушку бумажной изоляции при температуре не выше 403К, так как при повышении температуры сушки идет интенсивный процесс расплавления лигнина, который составляет 3,5...4,0% от общей массы. Для того чтобы провести сушку кабеля его укладывают в металлическую корзину. Корзину с кабелем размещают в вакуумном сушильно-пропиточном котле. В каждом котле вмещается две корзины.

Откачка газов и водяного пара из котла осуществляется с помощью вакуумных водокольцевых насосов (рис. 3).

Установка состоит из двух водокольцевых насосов 1, каждый из которых соединен с вакуумным объемом через клапан электрический 2, клапан аварийный 3, теплообменник 4, клапан вакуумный ручной 5. Давление в вакуумной магистрали измеряется вакуумметром 6. О подаче воды на водокольцевые насосы и теплообменник сигнализируют лампы, включаемые струйным реле 7.

На рис 4 приведена блок-схема разработанной вакуумной установки для сушки электрического кабеля с бумажной изоляцией.

Водокольцевой насос типа ВВН-6 предназначен для получения давления в рабочем котле до  $9,3 \cdot 10^3$  Па (70 мм рт. ст.). Его производительность при 0,02 МПа (150 мм рт. ст.) –  $5,0 \text{ м}^3/\text{мин.}$ , потребляемая мощность электродвигателя – 11кВт. Второй водокольцевой насос ВВН-3Э с эжектором создает предельное остаточное давление в откачиваемом объеме до 931Па (7мм рт. ст.). Его производительность при давлении  $2,66 \cdot 10^3$  Па (20 мм рт. ст.) -  $1,8 \text{ м}^3/\text{мин.}$ , потребляемая мощность – 5,5 кВт.

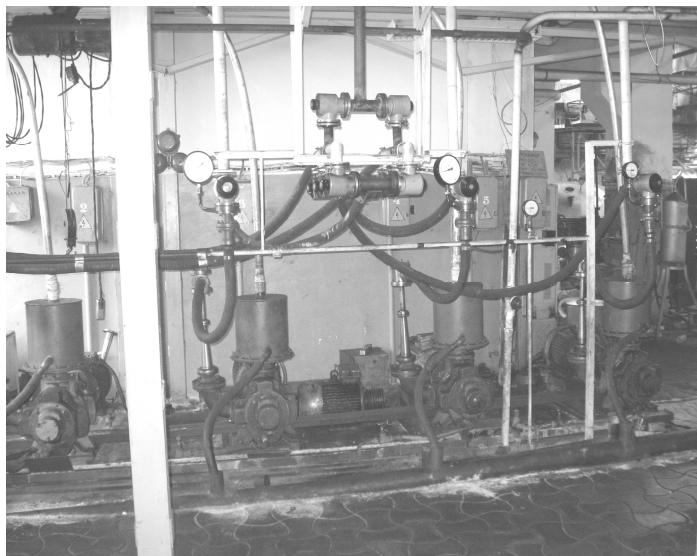


Рис. 3 – Вакуумное оборудование сушильно-пропиточного участка

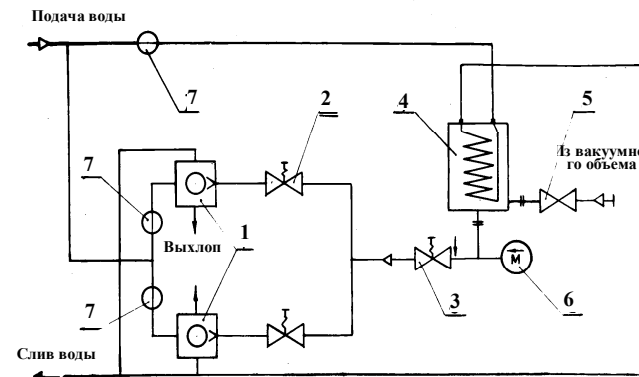


Рис. 4 – Блок-схема вакуумной установки для сушки-пропитки электрического кабеля с бумажной изоляцией

Электрический клапан 2, соединяющий водокольцевой насос с вакуумной магистралью, может быть открыт при работающем вакуумном насосе и необходимом количестве подаваемой в него воды.

Клапан аварийный 3 служит для автоматического отсоединения вакуумного насоса от откачиваемого объема при исчезновении напряжения в сети. При этом исключается попадание воды из вакуумного насоса в откачиваемый объем.

Теплообменник 4, установленный в верхней части установки, служит для конденсации водяного пара, откачиваемого из котла, и уменьшает количество тепловой энергии выделяемой в котле при передаче ее вакуумному водокольцевому насосу. Ручной клапан 5 соединяет вакуумный насос через вакуумный трубопровод с рабочим объемом.

Включение установки, наблюдение и управление за режимом работы установки осуществляется с пульта управления.

Процесс сушки кабеля в бумажной изоляции состоит из двух этапов. Первый этап сушки реально начинается с прогрева кабеля в вакуумном сушильно-пропиточном котле при атмосферном давлении. Это ускоряет нагревание кабеля до заданной температуры. После нагревания кабеля до заданной температуры при атмосферном давлении котел герметизируют, и производится откачка газов и пара из котла. Во время сушки кабель в бумажной изоляции нагревают до температуры 393К. Водяной пар с высокой температурой из котла устремляется в вакуумный насос. Для того, чтобы корпус вакуумного водокольцевого насоса не нагревался выше температуры указанной в его эксплуатационных характеристиках

между котлом и насосом необходимо устанавливать теплообменник. Применение теплообменника способствует понижению давления в котле и облегчает работу вакуумного насоса. В качестве охлаждающего агента в теплообменнике можно использовать воду. Тепловой расчет теплообменника сводится к определению его поверхности, которая отбирает на себя часть тепловой энергии парогазовой смеси, поступающей из вакуумного объема, во время сушки кабельных изделий, в вакуумный водокольцевой насос. Правильно подобранный теплообменник предотвращает нагревание водокольцевого насоса до температуры, при которой начинают ухудшаться его эксплуатационные характеристики.

В начальной стадии сушки водяные пары из котла откачивались с помощью вакуумного водокольцевого насоса ВВН-6, так как в это время сушки из бумажной изоляции выделяется большое количество пара (сотни м<sup>3</sup>). После того, как в котле было достигнуто давление 9,3кПа, насос ВВН-6 отключался и включался насос ВВН-3Э с эжектором, потребляемая мощность которого ниже в два раза, чем у вакуумного насоса типа ВВН-6. Это позволило сократить расход электроэнергии, удалить остаточную влагу из котла и понизить давление в котле до 931Па.

Таблица 1 – Результаты сушки кабеля на напряжение 10 кВ на вновь разработанной установке

Время работы установки, час, мин.	Давление в котле, кПа	Температура кабеля, К	Температура вакуум-провода на выходе из котла, К	Температура воды в вакуумном насосе, К
Включен насос ВВН6				
-	100,5	293	297	291
0,30	16,2	325	309	292
1,0	17,3	345	318	293
1,30	21,3	357	341	297
2,0	20,2	361	343	301
2,30	20,2	378	350	301
3,0	17,3	393	355	301
3,30	9,3	394	353	301
Включен насос ВВН3-Э				
4,0	0,93	401	341	296
4,30	0,93	403	327	293
5,0	0,93	403	327	292

Таблица 2 – Сушка кабеля в бумажной изоляции на вновь созданной установке

Сечение кабеля, мм	Длина, км	Длительность режима под вакуумом при остаточном давлении в котле не более 7,2 мм рт. ст.				Сокращение длитель- ности цикла, час
		Время сушки, час (новая установка)		Время сушки, час (старая установка)		
		Сушка	Пропитка	Сушка	Пропитка	
3×50	5,0	3,5	4.0	9	4	5,5
3×70	4,0	4.0	4.0	12	4	8.0
3×120	3,0	4.0	4.0	12	4	8,0

Из результатов, приведенных в таблице 1 видно, что основной процесс сушки кабеля был осуществлен за 4 часа. Об этом свидетельствует давление 931Па (7,0 мм рт.ст.) в рабочем котле и начало понижения температуры трубопроводов, теплообменника, насоса и повышения температуры кабеля. После проведения сушки бумажную изоляцию пропитывают специальным пропиточным составом. Эта операция призвана обеспечить пропитку бумажной изоляции и заполнение пустот пропиточным составом. Электрическое сопротивление изоляции должно быть не менее 100Мом на 1 км длины кабеля напряжением на 1кВ. и не менее 200Мом на 1 км кабеля напряжением 6, 10кВ. Тангенс угла диэлектрических потерь для кабеля на 10кВ должно быть не больше  $tg\delta \leq 0,008$ , [4]

Длительность сушки и пропитки кабеля с помощью новой вакуумной установки сокращена на 5,5...8 часов, таблица 2.

Пропитанный по новой технологии кабель выдержал электрические испытания. Изоляция соответствует требованиям, предъявляемым к изготавливаемой кабельной продукции.

**Применение фазовых регуляторов типа ROT для нагревания электрического кабеля в условиях промышленного производства.** Сушка силовых кабелей с бумажной изоляцией требует большого потребления тепловой энергии. В качестве источника тепла для нагревания кабеля дополнительно используют водяной пар, который проходит по тепловой рубашке рабочего котла, а в целях интенсификации процесса сушки применяется основное нагревание кабеля электрическим током, проходящим по его жилам плотностью 2,5 А/мм<sup>2</sup> для медных жил и - 2,0 А/мм<sup>2</sup> для алюминиевых.

Применение переменного тока считается нецелесообразным для нагревания кабеля в связи с увеличением потребляемой мощности за счет реактивной составляющей, так как кабель в корзине представляет собой значительное индуктивное сопротивление, что приводит к дополнительным потерям мощности на вихревые токи и гистерезис. В связи с этим для нагревания кабеля использовался постоянный ток, который вырабатывался мотор-генератором. КПД мотор-генератора 50%, размер (1,5х0,7х1,0)м, вес 860кг, максимальный ток, который мог дать данный генератор 500А. Используя данный мотор-генератор, можно было производить кабельную продукцию с максимальным сечением жилы до 240мм<sup>2</sup>. Для увеличения плотности тока в жилах кабеля с большим сечением необходимо было увеличить мощность генераторов, а для их размещения нужны дополнительные производственные площади. Применение генераторов постоянного тока приводит к трудности поддержания постоянной плотности тока в жилах кабеля в процессе нагревания, а наличие сильного постоянного магнитного поля (выше 40кЭ) в пространстве около котла, отрицательно сказывалось на здоровье обслуживающего персонала, так как кабель в корзине представляет собой соленоид с большим количеством витков. Напряженность магнитного поля, в соленоиде с сердечником определяется из выражения

$$H = \frac{k\mu N^2 SI}{l \cos \alpha}, \quad (1)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля, Э;  $k$  – коэффициент, зависящий от отношения  $\frac{l}{d}$ ;  $d$  – диаметр соленоида, м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $N$  – количество витков соленоида;  $S$  – площадь поперечного сечения соленоида, м<sup>2</sup>;  $I$  – ток, протекающий по жилам кабеля, А;  $l$  – длина соленоида, м;  $\cos \alpha$  – косинус угла между вектором магнитной индукции и нормалью к поверхности контура;

Для  $\frac{l}{d} \geq 10$  коэффициент  $k$  равен 1.

Из выражения 1 следует, что при  $I \rightarrow 0$ , напряженность магнитного поля  $H$  будет стремиться к нулю. Поэтому, если скомпенсировать все токи, протекающие во время сушки по жилам кабеля, то удастся снизить напряженность магнитного поля до нуля, не нарушив технологический процесс, и поставленная задача будет выполнена. Это позволит исключить пагубное воздействие магнитного поля на организм обслуживающего персонала.

В последнее время в кабельной промышленности получил широкое распространение прогрессивный метод нагревания жил кабелей при

помощи тиристорных преобразователей. Это позволило повысить качество выпускаемой продукции, увеличить пропускную способность участка сушки-пропитки, повысить оперативность управления и культуру производства, улучшить условия труда обслуживаемому персоналу.

Для нагревания кабельных изделий с бумажной изоляцией на базе регулятора однофазного тиристорного (РОТ) была спроектирована и внедрена новая тиристорная установка с максимальным током 1800А., что позволило изготавливать кабель в бумажной изоляции с сечением жилы до 800мм<sup>2</sup> [5].

Фазовые регуляторы типа РОТ являются быстродействующими электронными устройствами, способными в широких пределах регулировать ток в нагрузке. КПД фазового регулятора 95%. Размеры такого устройства (310х280х260)мм, вес 11 кг. Управление регулятором осуществляется с помощью электронного блока, на который подается специальный синхроимпульс. Органы управления регулятором установлены на лицевой панели самого регулятора. Сами же фазовые регуляторы устанавливаются в пульте управления. В этом же пульте устанавливаются все аппараты управления установкой, сигнализация и приборы для контроля тока. Измерение тока в каждой жиле производится с помощью амперметра, расположенного на лицевой панели стойки управления. Каждая жила кабеля питается от своего индивидуального тиристорного преобразователя РОТ, который обеспечивает в жиле необходимую плотность тока. Вторые концы жил 3-х жильного кабеля соединяются между собой и изолируются от корпуса котла (рис.5).

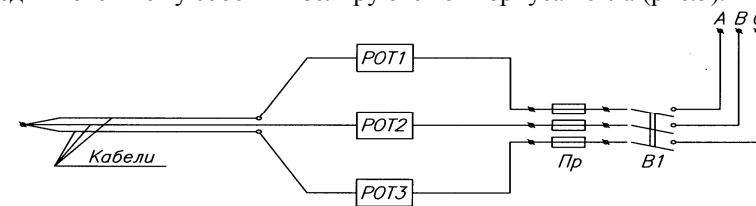


Рис. 5 – Схема подключения тиристорных преобразователей

При таком подключении кабеля к источнику питания все токи, протекающие по жилам кабеля, компенсируются, исчезает магнитное поле, а нагрузка превращается в чисто активное сопротивление. Так как согласно правилу Кирхгофа алгебраическая сумма токов  $I_K$ , сходящихся в точке разветвления проводников, равна нулю

$$\sum_{K=1}^{\ell} I_K = 0, \quad (2)$$

где  $\ell$  – число сходящихся токов, поэтому напряженность магнитного поля возле котла будет равна нулю.

Вновь созданная установка на базе тиристорных регуляторов типа ROT-630 позволяет плавно изменять напряжение 0...380 В на каждой жиле в отдельности и обеспечить необходимую плотность тока в каждой жиле, в связи с чем уменьшается время нагревания электрического кабеля в бумажной изоляции до необходимой температуры и увеличивается скорость сушки (рис.6).

**Система автоматического управления процессом сушки и пропитки кабеля с бумажной изоляцией.** На установке сушки – пропитки бумажной изоляции силовых кабелей внедрена система управления технологическим процессом на базе программируемого контроллера фирмы Siemens. Система позволяет выполнять функции автоматического контроля температуры, давления, плотности тока в жилах кабеля, уровня пропитывающего состава, времени технологического процесса. Выполняются функции автоматического управления работой вакуумных насосов, регулятором однофазным тиристорным (ROT). Функции диалогового режима обеспечивают оперативную связь между персоналом и системой управления с помощью панели оператора. На экране панели оператора отображается мнемосхема технологического процесса, графики изменения температуры в корзинах и тока в жилах кабеля, давления от времени. Значения температуры, тока, давления распечатываются в виде протокола. Система сигнализирует о неисправностях в работе оборудования, а также при отклонениях контролируемых параметров от заданных значений. Оптимальный режим сушки – пропитки кабеля с бумажной изоляцией может быть реализован только с использованием системы автоматического управления технологическим процессом. Система управления позволяет оптимизировать процесс сушки – пропитки по минимальному потреблению энергии. Все поставленные задачи управления процессом, и особенно алгоритмы оптимального управления процессом сушки, решены с помощью цифровой системы управления. Кроме того, цифровая система управления позволяет реализовывать различные алгоритмы управления и оптимизации, вести статистическую обработку различных технологических процессов и по результатам анализа совершенствовать технологические процессы.

Система управления содержит: блок управления, цифро-аналоговый преобразователь, мультиплексор, многоканальный цифро-аналоговый преобразователь, исполнительный механизм управления оборудованием, измерительный преобразователь давления, измерительный преобразователь температуры, аналого-цифровой преобразователь, мультиплексор, многоканальный аналого-цифровой преобразователь

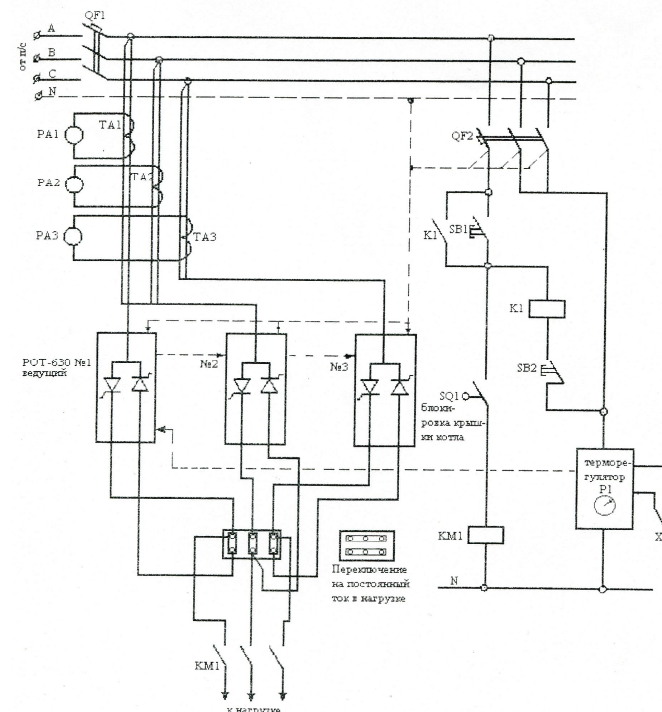


Рис. 6 – Схема трехфазного регулятора на базе однофазных регуляторов типа ROT-630

Таблица 3 – Перечень контролируемых и управляемых параметров

№п/п	Наименование параметров	Вид	Сигнал	Количество, шт.
1	Температура в корзине	анал.	0-50 мВ	12
2	Ток в жилах кабеля	анал.	4-20 мА	18
3	Давление в котле	анал.	4-20 мА	3
4	Уровень пропиточного состава в котле	анал.	4-20 мА	3
5	Сопротивление изоляции кабеля в корзине	анал.	4-20 мА	6
6	Управление ROT	анал.	0-5 мВ	18
7	Закрытие крышки котла	дис.	контакт	3
8	Работа вакуумного насоса.	дис.	контакт	6

Функции автоматического контроля:

- контроль температуры изоляции;
- контроль давления в котле;
- контроль тока в жилах кабеля;
- контроль сопротивления изоляции;
- контроль уровня пропиточного состава в котле;
- контроль времени технологического процесса;
- контроль готовности котла к пуску;
- контроль за работой регулятора однофазного тиристорного (POT);
- контроль за работой вакуумных насосов.

Функции автоматического управления:

1. включение POT;
2. поддержание заданной величины тока в жилах кабеля;
3. поддержание заданной температуры кабеля;
4. включение вакуумных насосов;
5. отключение POT;
6. выключение вакуумных насосов;
7. подача пропиточного состава в котел;
8. удаление пропиточного состава из котла.

Функции диалога обеспечивают организацию оперативной связи между персоналом и системой управления с помощью панели оператора MP270, рис.7.

На экране панели оператора отображается график изменения температуры в корзинах, тока в жилах кабеля и сопротивления изоляции. управления протоколами, экран дистанционного управления, схемы технологического процесса сушки-пропитки электрического кабеля с бумажной изоляцией, рис. 8.



Рис. 7 – Панель оператора

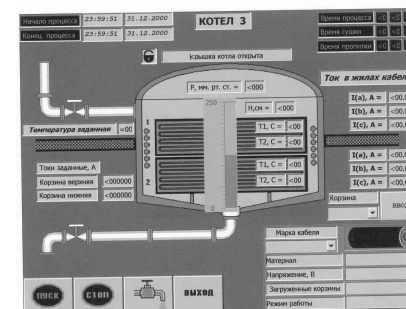
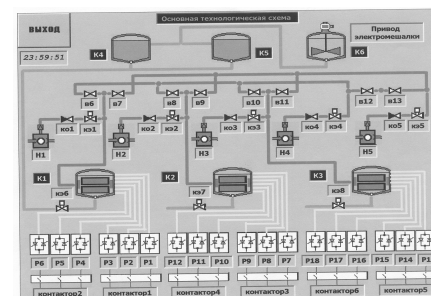


Рис. 8 – Экраны панели оператора

Схема (рис. 8) показывает, какие задействованы в работе котлы, какие включены вакуумные насосы и POT, какие открыты вакуумные клапаны и указывает номер котла и корзины, время, дату включения установки, марку кабеля, изменение температуры и тока, кабеля, давления в корзине, время сушки кабеля, время пропитки кабеля, время выключения установки для сушки-пропитки кабеля с бумажной изоляцией. Существенной особенностью пользовательского интерфейса системы управления является использование интуитивно понятной модели представления информации и взаимодействия с оператором, что позволило добиться высокой эффективности работы персонала. Время, необходимое на подготовку оператора для работы с системой управления в среднем составляет около 10 минут.

**Выводы.** Модернизация установки сушки-пропитки бумажной изоляции силовых кабелей позволила:

- сократить более чем в 2 раза энергетические затраты на сушку электрического кабеля с бумажной изоляцией;

- усовершенствовать технологический процесс сушки-пропитки кабельных изделий с бумажной изоляцией, сократить время сушки более чем в 1,5 раза, устранить брак кабельной продукции;
- обеспечить минимальное остаточное давление в сушильно-пропиточном котле, повысить качество сушки и пропитки, а также надежность работы вакуумной установки;
- ускорить процесс нагревания кабеля, повысить оперативность управления технологическим процессом, плавно изменять напряжение на жилах кабеля, обеспечивать заданную плотность тока в жилах кабеля, устранить магнитное поле вокруг котла;
- увеличить пропускную способность вакуумных коммуникаций, уменьшить металлоемкость установки и увеличить скорость сушки бумажной изоляции;
- создать систему управления технологическим процессом на базе программируемого контроллера фирмы Siemens технологического контроля на различных операциях сушки-пропитки электрического кабеля с бумажной изоляцией, что позволило исключить возможность появления брака и усовершенствовать технологический процесс;
- улучшить условия труда обслуживающего персонала, повысить культуру производства, снизить загрязнение окружающей среды, уменьшить занимаемые производственные площади;
- производить кабель с сечением токопроводящей жилы до 800мм<sup>2</sup>, вместо ранее существовавшего ограничения до 240мм<sup>2</sup>.

**Список литературы.** 1. Третьяков В.М. Сушка и пропитка силовых кабелей / В.М. Третьяков, С.Д. Холодный. – М.: Энергия, 1978.-136с. 2. А.с.346. Россия, МПК H01B13/30. Вакуумная сушильно-пропиточная установка / В.П. Алексеенко, В.П. Карпушенко, В.А. Кутовой и др. – № 93016105; заявл. 29.03.93; опубл.15.04.95, Бюл. №4. 3. Карпушенко В.П. Силовые кабели на напряжение 1-10кВ / В.П. Карпушенко, Л.А. Щербенюк, Ю.А. Антонец, А.А. Науменко. – Харьков: Факт, 1998. – С.96-104. 4. Карпушенко В.П. Силові кабелі низької та середньої напруги / В.П. Карпушенко, Л.А. Щербенюк, Ю.А. Антонец, А.А. Науменко. Харків, «Регіон-інформ». 2000.- С.113-117. 5. А.с. 2047. Россия, МПК H01B13/00. Сушильно-пропиточная установка для изготовления кабелей/ В.П.Карпушенко, В.А. Кутовой, В.И. Маханьков, И.Б. Пешков. – №95101099; заявл. 25.01.95; опубл.16.04. 96, Бюл. №4. 6. Золотарев В.М. Мониторинг показателей качества бумажной изоляции силовых кабелей напряжением 10 кВ на заводе "Южкабель" / В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, Ю.А. Антонец, Н.П. Чувурин, Л.А.Щербенюк // Вісник Харківського державного політехнічного університету.- Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 88.- С. 22-31. 7. Гурин А.Г. Способ технологического контроля изоляции бумажно-масляных кабелей в процессе сушки и пропитки / А.Г. Гурин, Б.Г. Набока // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 1999.- Вип. 64.- С. 5-10. 8. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обследование трехфазных кабелей в металлической оболочке // Электричество. – 2011.– №1.– С. 48-54. 9. Куц П.С. Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции / П.С. Куц, И.Ф. Пикус.- Минск: Наука и техника, 1979.– 275 с.

Поступила в редколлегию 22.04.2011

УДК 621.316: 621.316.1

**А.В.ЕФИМОВСКИЙ**, соискатель, НТУ «ХПИ»  
**Ю.В. ВЛАДИМИРОВ**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»  
**Е.С. КОБЕЦ**, магистр, НТУ «ХПИ»

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ В СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ В РЕЖИМЕ ПЕРЕВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрен вопрос дополнительных потерь в синхронных двигателях обусловленных генерацией реактивной мощности при разных режимах работы и параметрах сети питания. В сводной таблице приведены области дополнительных потерь для разных моделей двигателей.

Розглянуто питання додаткових втрат в синхронних двигунах обумовлених генерацією реактивної потужності при різних режимах роботи і параметрах мережі живлення. У звідній таблиці приведені області додаткових втрат для різних моделей двигунів.

The question of additional losses is considered in synchronous engines conditioned by the generation of reactive-power at different office hours and parameters of feed-in network. In a summary table areas over of additional losses are brought for the different models of engines

**Постановка проблемы.** Одним из основных вопросов при рассмотрении использования синхронных двигателей (СД) для компенсации реактивной мощности (КРМ) является наличие дополнительных потерь активной мощности  $\Delta P$ , которые идут на выработку реактивной мощности (РМ). В общем случае эти потери являются функцией трёх величин [1]:

$$\Delta P = f(\alpha, \beta, U), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент загрузки СД по реактивной мощности,  $\beta$  – коэффициент загрузки СД по активной мощности и  $U$  – напряжение питания СД. Если коэффициент  $\beta$  и напряжение сети  $U$  являются величинами известными для конкретного предприятия, то коэффициент загрузки по реактивной мощности можно изменить посредством изменения тока возбуждения двигателя. Минимальный коэффициент  $\alpha$  выбирается исходя из условий статической и динамической устойчивости СД [2]. Как правило, при минимально возможном токе возбуждения (режим недовозбуждения) СД сам является потребителем РМ, т.е. ведёт себя как активно-индуктивная нагрузка. Это редкий и в большинстве случаев неустойчивый режим его работы. Поэтому при избытке РМ в узле нагрузки, СД выгодней переводить в режим работы с  $\cos\varphi=1$ , в котором потери в СД будут минимальны [3].

Располагаемая (максимальная) РМ генерируемая СД, определяется тепловым режимом СД с учётом форсировки возбуждения при